



大兴安岭伊勒呼里山中段正长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地球化学特征

韩 宇¹, 孙鹏志², 马 双³, 尹志刚⁴, 刘志学¹, 李伯男¹, 李海娜⁴, 陈骁帅⁵

1. 辽宁省自然资源事务服务中心, 辽宁 沈阳 110033;

2. 内蒙古平庄煤业(集团)有限责任公司元宝山露天煤矿, 内蒙古 赤峰 024000;

3. 辽宁省第五地质大队有限责任公司, 辽宁 大石桥 115100;

4. 辽宁工程技术大学 矿业学院, 辽宁 阜新 123000; 5. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037

摘 要: 对伊勒呼里山中段正长花岗岩开展岩相学、地球化学、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年研究, 结果表明其具有高硅、富碱、贫镁钙, 低 FeO^T/MgO 比值特征, 属准铝质—弱过铝质、高钾钙碱性系列。轻稀土富集, 重稀土亏损, 铕负异常; 富集大离子亲石元素 Rb、Th、K, 亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti、P 和大离子亲石元素 Ba、Sr、La, 为典型的低 Ba-Sr、高分异 I 型花岗岩, 是地壳物质部分熔融产物。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年加权平均年龄为 143.90 ± 1.20 Ma, 属早白垩世早期。结合区域研究资料, 岩体是在蒙古—鄂霍次克洋构造域造山后伸展环境下, 地壳发生拆沉作用, 导致岩石圈减薄, 基性岩浆上涌接触地壳, 使地壳物质发生部分熔融作用的产物。

关键词: 正长花岗岩; 锆石 U-Pb 年龄; 早白垩世; 蒙古—鄂霍次克洋; 伊勒呼里山

The syenogranite in the middle section of Yilehuli Mountain, Daxinganling Mountains: LA-ICP-MS zircon U-Pb age and geochemical characteristics

HAN Yu¹, SUN Peng-zhi², MA Shuang³, YIN Zhi-gang⁴, LIU Zhi-xue¹, LI Bo-nan¹, LI Hai-na⁴, CHEN Xiao-shuai⁵

1. Liaoning Provincial Natural Resources Affairs Service Center, Shenyang 110033, China;

2. Yuanbaoshan Open-pit Coal Mine of Inner Mongolia Pingzhuang Coal Industry (Group) Co., Ltd., Chifeng 024000, Inner Mongolia, China;

3. Liaoning Fifth Geological Brigade Co., Ltd., Dashiqiao 115100, Liaoning Province, China;

4. School of Mining Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning Province, China;

5. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

Abstract: The paper comprehensively studies the petrography, geochemistry, and LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of

收稿日期: 2024-04-22; 修回日期: 2024-07-24. 编辑: 李兰英.

基金项目: 中国地质调查局项目“黑龙江 1:5 万 1147 高地(M51E004015)、工队(M51E004016)、1302 高地(M51E005015)、1070 高地(M51E005016)幅区域地质调查”(1212011120659).

作者简介: 韩宇(1993—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事矿业权管理、矿山建设、区域地质矿产调查研究, 通信地址 辽宁省沈阳市崇山东路 29 号, E-mail//893597095@qq.com

通信作者: 孙鹏志(1988—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事边坡管理、地质灾害管理工作, 通信地址 内蒙古赤峰市元宝山区内蒙古平庄煤业(集团)有限责任公司元宝山露天煤矿, E-mail//2533215652@qq.com

引用格式: 韩宇, 孙鹏志, 马双, 尹志刚, 刘志学, 李伯男, 李海娜, 陈骁帅. 大兴安岭伊勒呼里山中段正长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地球化学特征[J]. 地质与资源, 2025, 34(3): 265-276, 290.

Han Y, Sun P Z, Ma S, Yin Z G, Liu Z X, Li B N, Li H N, Chen X S. The syenogranite in the middle section of Yilehuli Mountain, Daxinganling Mountains: LA-ICP-MS zircon U-Pb age and geochemical characteristics [J]. Geology and Resources, 2025, 34(3): 265-276, 290.

the syenogranite in the middle section of Yilehuli Mountain. The results show that the syenogranite is characterized by high Si and rich alkali contents, poor Mg and Ca contents, and low FeO^T/MgO ratio, belonging to quasialuminous-weakly peraluminous and high-K calc-alkaline series. The rock, with enriched LREEs, depleted HREEs and negative Eu anomaly, as well as enriched LILEs (Rb, Th, and K) and depleted HFSEs (Nb, Ta, Ti, and P) and LILEs (Ba, Sr, and La), is identified as a typical low Ba-Sr, highly fractionated I-type granite, formed by partial melting of crustal materials. The LA-ICP-MS zircon U-Pb dating yields a weighted mean age of 143.90 ± 1.20 Ma, indicating the early stage of Early Cretaceous. Combined with regional geological data, the pluton is the product of partial melting of crustal materials under the post-orogenic extensional setting within the Mongolia-Okhotsk Ocean tectonic domain, where the crustal delamination led to lithospheric thinning and upwelling of basic magma to contact with the crust.

Key words: syenogranite; zircon U-Pb age; Early Cretaceous; Mongolia-Okhotsk Ocean; Yilehuli Mountain; Daxinganling Mountains

0 前言

伊勒呼里山中段位于大兴安岭北部,是东亚大陆边缘东部重要组成部分,自新元古代以来构造演化可分为3个阶段,分别是古亚洲洋构造体系、蒙古-鄂霍次克洋构造体系和环太平洋构造体系。该地区中生代构造岩浆作用强烈,岩浆岩带大体上呈NE向带状分布,大面积发育中生代花岗岩。近些年来,许多学者对大兴安岭中生代花岗岩进行了研究^[1-4],为大兴安岭中生代岩浆岩研究积累了丰富的研究成果。花岗岩作为大陆地壳的主要组成部分,与大陆地壳生长有直接联系,是大陆形成和演化的标志物之一。研究数据显示,不同成因的花岗岩常产生于不同的大地构造环境,并具有不同的地球化学特征^[5-8],其研究是解决大陆地壳组成和演化问题的重要窗口。同时花岗岩中蕴含着丰富的矿藏,并与许多重要内生金属矿床有着密切的成因联系,对花岗岩的研究亦有利于寻找与其有关的金属矿产^[9]。

基于花岗岩研究的重要意义,本文以伊勒呼里山中段正长花岗岩为研究对象,在野外调查基础上,结合地层学、岩相学、岩石地球化学及同位素年代学相关知识,对岩体进行详细研究,确定岩浆源区性质、岩石成因及形成年代,并进一步探讨大地构造环境和深部地质作用等地质问题,以期为该地区进一步开展野外地质工作和寻找与岩浆岩有关矿产提供依据,同时为揭示伊勒呼里山中段地区早白垩世岩石圈的地球动力学演化及岩浆演化提供参考。

1 区域地质背景及岩相学特征

研究区位于额尔古纳地块东南部,塔源-喜贵图

缝合带于研究区东南缘经过(图1a),板块构造区划属于西伯利亚古板块大陆边缘向南增生部分与环太平洋构造带(新华系一级构造带的第三隆起带北段大兴安岭隆起带)叠加区,为大兴安岭-燕山中生代火山-侵入岩带,也是中国东部大陆环太平洋火山活动带的重要组成部分。古生界为兴安地层区达来-兴隆地层分区,中生界属滨太平洋地层区大兴安岭-燕山地层分区,出露地层主要包括新元古界一下寒武统德勒根岩群吉祥沟岩组,中生界的塔木兰沟组、满克头鄂博组、玛尼吐组、白音高老组,新生界第四系。早白垩世正长花岗岩主要分布于研究区的中南部,大致呈北东向分布,出露面积约22.97 km²(图1b)。正长花岗岩侵入到中侏罗世中粒二长花岗岩体内,被晚期的正长岩、花岗斑岩侵入,正长花岗岩侵入中侏罗世中粒二长花岗岩的界面产状为 $125^\circ \angle 65^\circ$ (图2)。

早白垩世正长花岗岩,呈灰黄色,中细粒、细粒花岗岩结构,块状构造(图3a)。由黑云母(1%~3%)、斜长石(7%~23%)、钾长石(45%~73%)、石英(20%~35%)组成,角闪石偶见。矿物粒度0.2~5.0 mm,以2~4 mm为主。黑云母呈黄褐色、褐色,片状,晶体周围偶见黑色铁质,粒度0.3~1.5 mm,电子探针分析结果为铁黑云母;斜长石呈半自形板状,聚片双晶较细,环带发育,多为中长石,中心被绢云母、黏土矿物不均匀交代,大小0.3~3.5 mm,电子探针分析结果为更长石;钾长石呈半自形板状—他形粒状,简单双晶,条纹结构,条纹多呈粗脉状,格子双晶,为微斜条纹长石,大小0.8~5.0 mm,电子探针分析结果为正长石;石英呈他形粒状,波状消光,晶面裂隙可见,多呈团块状集合体分布,大小0.7~3.5 mm(图3b)。副矿物总量较低,以褐帘石为主,主要

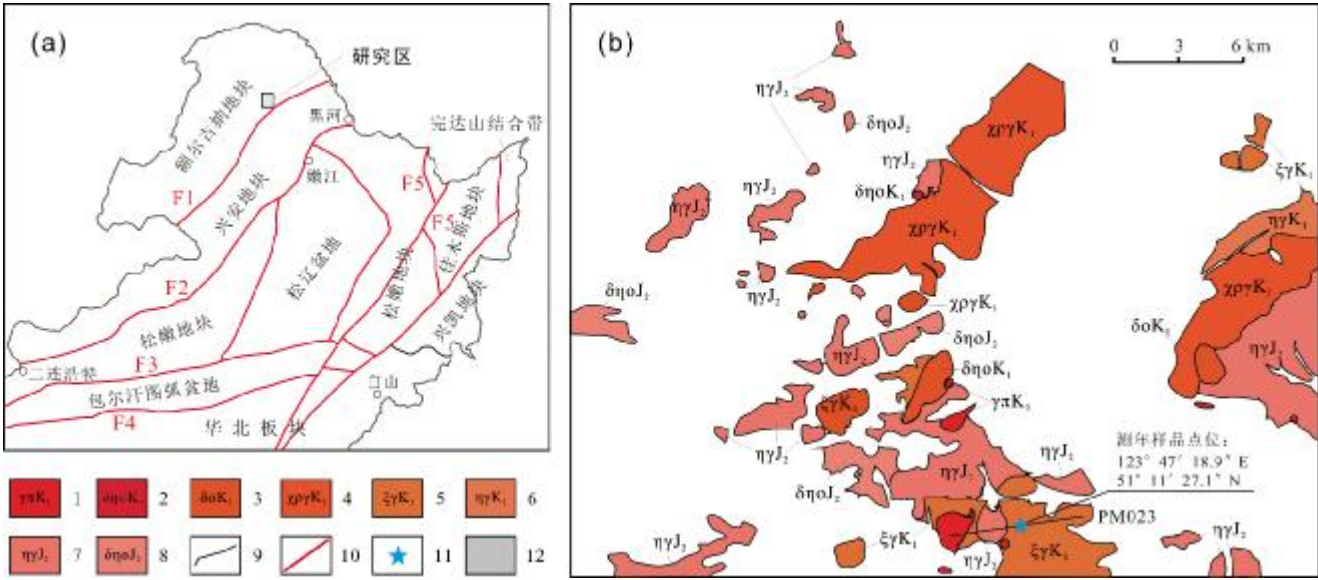


图 1 研究区地质构造图

Fig. 1 Tectonic and geological map of the study area

a—东北地区大地构造简图(tectonic sketch map of Northeast China); b—伊勒呼里山中段中生代侵入岩分布图(distribution of Mesozoic intrusive rocks in the middle section of Yilehuli Mountain); F1—塔源—喜桂图缝合带(Tayuan-Xiguitu suture zone); F2—贺根山—黑河缝合带(Hegenshan-Heihe suture zone); F3—西拉木伦—长春缝合带(Xar Moron-Changchun suture zone); F4—赤峰—开原断裂带(Chifeng-Kaiyuan fault belt); F5—嘉荫—牡丹江断裂带(Jiayin-Mudanjiang fault belt); 1—早白垩世花岗岩斑岩(Early Cretaceous granite porphyry); 2—早白垩世石英二长闪长岩(Early Cretaceous quartz monzodiorite); 3—早白垩世石英闪长岩(Early Cretaceous quartz diorite); 4—早白垩世似斑状碱长花岗岩(Early Cretaceous porphyritic alkali-feldspar granite); 5—早白垩世正长花岗岩(Early Cretaceous syenogranite); 6—早白垩世二长花岗岩(Early Cretaceous monzogranite); 7—中侏罗世二长花岗岩(Middle Jurassic monzogranite); 8—中侏罗世石英二长闪长岩(Middle Jurassic quartz monzodiorite); 9—地质界线(geological boundary); 10—同位素采样位置(isotope sampling location); 11—研究区(study area); 12—断层(fault)

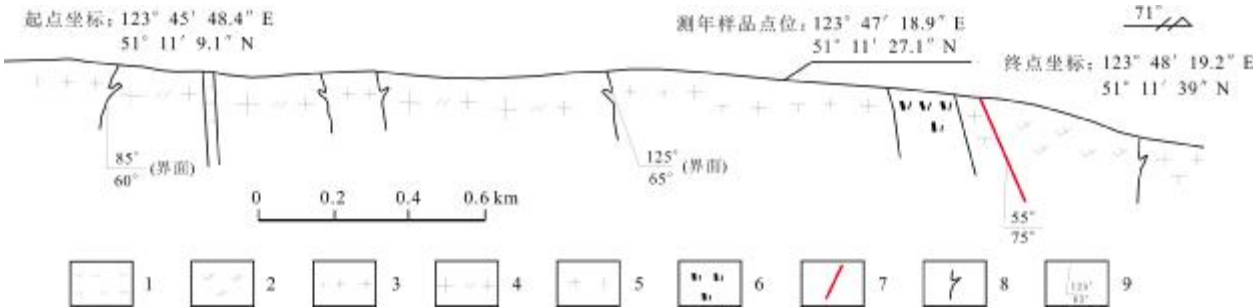


图 2 正长花岗岩实测剖面(PM023)

Fig. 2 Surveyed profile PM023 of syenogranite

1—流纹岩(rhyolite); 2—英安岩(dacite); 3—中细粒正长花岗岩(fine-medium-grained syenogranite); 4—中细粒二长花岗岩(fine-medium-grained monzogranite); 5—花岗岩斑岩(granite porphyry); 6—流纹斑岩(rhyolite porphyry); 7—断层(fault); 8—接触面(interface); 9—产状(occurrence)

组合为褐帘石±石榴石+锆石+榍石±钛铁矿+褐铁矿+磁铁矿。

2 分析方法

在正长花岗岩岩体不同部位共采集 4 件新鲜无蚀

变样品进行岩石地球化学分析,并选取其中 1 件样品进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年研究.测年样由河北省地质矿产局区域地质调查大队实验室(廊坊)用常规方法粉碎达 80~100 目,经淘选和电磁选方法进行分离,再通过双目镜下挑选出晶形、透明度较好,裂隙和

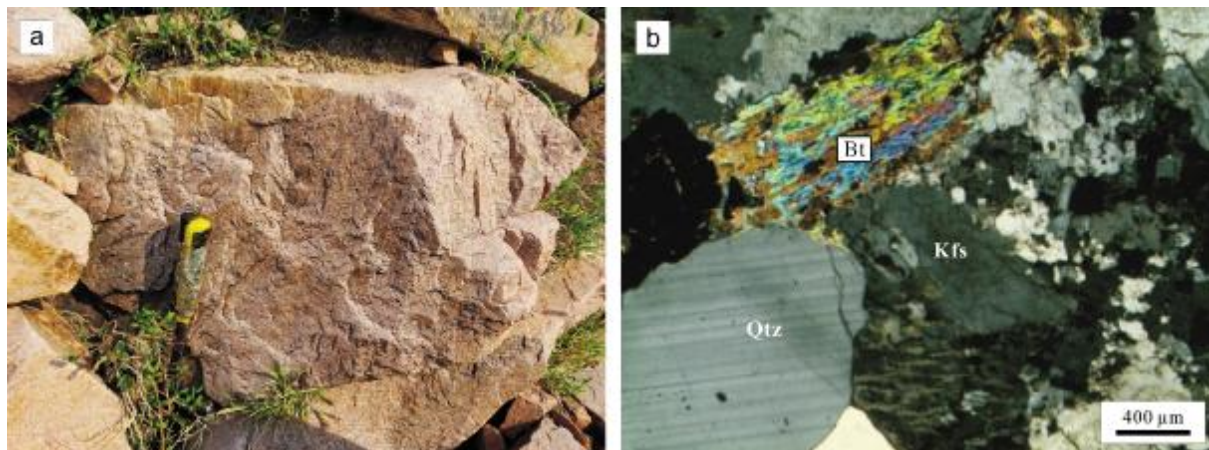


图 3 正长花岗岩野外照片及正交偏光镜下显微照片

Fig. 3 Field and microscopic photographs of syenogranite

Qtz—石英(quartz); Kfs—钾长石(K-feldspar); Bt—黑云母(biotite)

包体较少,表面洁净的锆石颗粒用于测年研究.在北京离子探针中心完成锆石制靶和阴极发光(CL)图像的采集.锆石 U-Pb 同位素分析在天津地质调查中心进行,采用仪器为 ThermoFisher 公司制造的 Neptune 型 LA-ICP-MS 和 Cetac 公司制造的 GeolasPro193 准分子型激光系统联机对锆石进行剥蚀,深度为 20~40 μm ,激光剥蚀斑束直径 35 μm .主量元素测定由黑龙江省地质调查研究总院实验室完成,采用 X 射线荧光光谱仪测定,相对标准偏差为 2%~5%.微量和稀土元素测定由沈阳地质调查中心实验测试中心完成,采用电感耦合等离子体质谱仪测定,相对标准偏差小于 10%.

3 测试结果

3.1 锆石 U-Pb 年代学特征

从正长花岗岩样品(D3673)中选取了 25 颗锆石进行测年分析,分析结果见表 1.样品锆石呈浅黄白色,透明度好,粒径约为 100~200 μm ,长宽比为 2:1~3:1.锆石阴极发光(CL)图像(图 4)显示,所测锆石具有较明显的振荡环带,样品中的 Th、U 含量较高, Th/U 为 0.3362~2.6476,为典型的岩浆成因锆石^[2,10-11].25 个测试数据全部落在了谐和线上及附近(图 5), LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄集中分布在 139~149 Ma 之间,25 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均值为 143.9 ± 1.2 Ma (MSWD=3.4),代表岩浆结晶年龄.获得年龄数据属于早白垩世早期(145~120 Ma),表明在伊勒呼里山中段地区存在早白垩世花岗质岩浆活动.

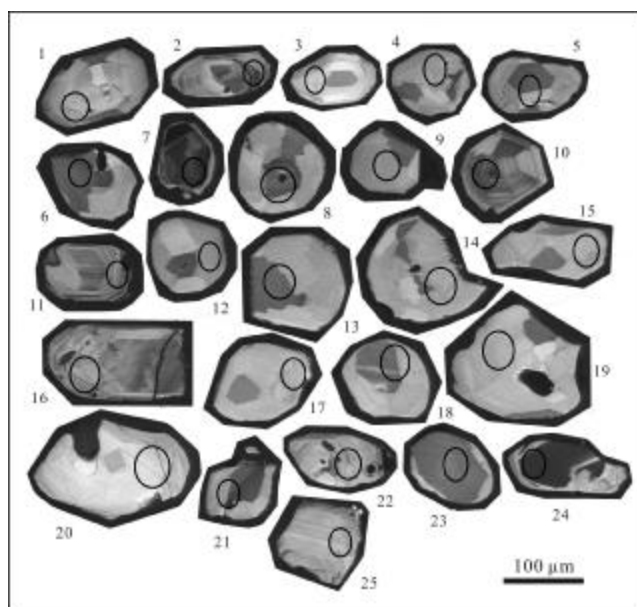


图 4 正长花岗岩锆石(D3673)阴极荧光图像

Fig. 4 CL images of zircons from syenogranite sample D3673

3.2 主量元素地球化学特征

正长花岗岩样品主量元素分析数据见表 2. SiO_2 含量为 75.20%~75.88%(质量分数), CaO 为 0.38%~0.59%, TiO_2 为 0.14%~0.25%, MgO 为 0.24%~0.43%, FeO^T 为 2.19%~2.87%,全碱($\text{ALK}=\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$)8.44%~9.26%, FeO^T/MgO 为 6.28~9.12, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值介于 1.00~1.39,表现为高硅、高碱、相对富钾特征.样品在硅-碱图解(图 6a)中全部落入亚碱性系列的区域内,在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解(图 6b)中全部落入高钾钙碱性区域,在 $\text{A}/\text{CNK}-\text{A}/\text{NK}$ 图解(图 6c)中全部落入准铝质-

表 1 正长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果(D3673)

Table 1 The LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results of syenogranite sample D3673

编号	同位素比值						年龄/Ma					
	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ
1	0.0222	0.0002	0.1548	0.0015	0.0505	0.0005	142	1	146	1	217	22
2	0.0225	0.0002	0.158	0.0013	0.0509	0.0004	143	2	149	1	238	18
3	0.0218	0.0002	0.1543	0.0058	0.0513	0.0019	139	1	146	6	253	84
4	0.0227	0.0003	0.1635	0.0019	0.0522	0.0006	145	2	154	2	292	26
5	0.0219	0.0002	0.1465	0.006	0.0486	0.0019	139	1	139	6	127	94
6	0.0224	0.0004	0.1553	0.0108	0.0502	0.0033	143	3	147	10	206	154
7	0.022	0.0002	0.169	0.0045	0.0557	0.0014	140	1	159	4	440	54
8	0.0224	0.0002	0.1524	0.0013	0.0493	0.0004	143	2	144	1	160	19
9	0.0222	0.0003	0.164	0.008	0.0535	0.0025	142	2	154	8	349	107
10	0.0229	0.0002	0.1591	0.0013	0.0504	0.0004	146	1	150	1	215	17
11	0.0221	0.0004	0.1745	0.0064	0.0573	0.0017	141	3	163	6	505	65
12	0.0227	0.0002	0.1612	0.0013	0.0515	0.0005	145	1	152	1	265	21
13	0.0223	0.0002	0.1599	0.0019	0.052	0.0004	142	2	151	2	286	19
14	0.0232	0.0002	0.166	0.0029	0.052	0.0009	148	1	156	3	283	40
15	0.0232	0.0002	0.1706	0.0016	0.0534	0.0004	148	1	160	1	345	18
16	0.0227	0.0005	0.1743	0.0178	0.0557	0.0054	145	3	163	17	442	214
17	0.0234	0.0002	0.1602	0.0016	0.0498	0.0005	149	1	151	2	184	23
18	0.0226	0.0002	0.1606	0.002	0.0516	0.0006	144	1	151	2	268	25
19	0.0231	0.0003	0.1669	0.0092	0.0523	0.0028	148	2	157	9	299	121
20	0.0227	0.0004	0.1754	0.0035	0.0562	0.001	144	2	164	3	459	39
21	0.0233	0.0004	0.1786	0.0102	0.0556	0.003	149	2	167	10	435	122
22	0.0225	0.0003	0.1656	0.0023	0.0534	0.0007	143	2	156	2	347	28
23	0.0232	0.0003	0.1724	0.0022	0.054	0.0006	148	2	161	2	371	24
24	0.0225	0.0002	0.1622	0.0039	0.0522	0.0012	144	2	153	4	293	54
25	0.0224	0.0002	0.1609	0.0015	0.052	0.0004	143	1	151	1	285	19

测试单位:中国地质调查局天津地质调查中心测试中心.

弱过铝质岩石区域,表明样品为亚碱性、钾质-高钾钙碱性系列,属准铝质-弱过铝质花岗岩.样品铁镁钙含量较低,比中国花岗岩的平均成分(CaO 1.34%, MgO 0.64%)要低得多^[12].

3.3 稀土元素地球化学特征

正长花岗岩样品稀土元素分析数据见表 3. 稀土

元素总量(ΣREE)为 55.59×10⁻⁶~101.2×10⁻⁶(平均值 81.31×10⁻⁶),远小于陆壳平均值(154.7×10⁻⁶).轻稀土(LREE)(质量分数)42.59×10⁻⁶~91.09×10⁻⁶,重稀土(HREE)4.62×10⁻⁶~5.96×10⁻⁶,相对富含轻稀土元素(LREE)、贫重稀土元素(HREE).LREE/HREE 为8.42~18.9,(La/Yb)_N3.91~19.26,轻重稀土分馏较明显.稀

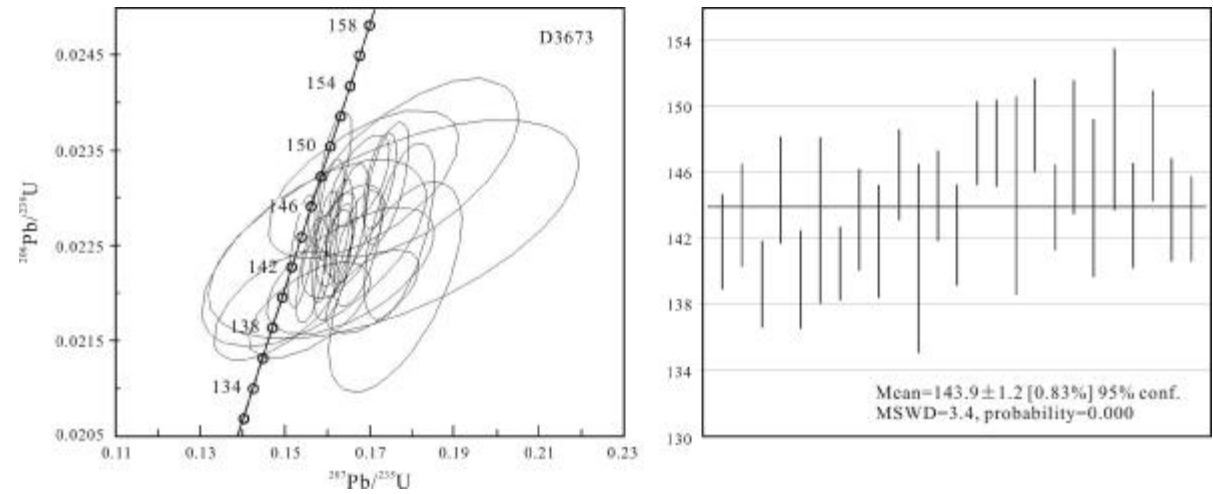


图 5 正长花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 谐和年龄

Fig. 5 The LA-ICP-MS U-Pb concordia age of syenogranite

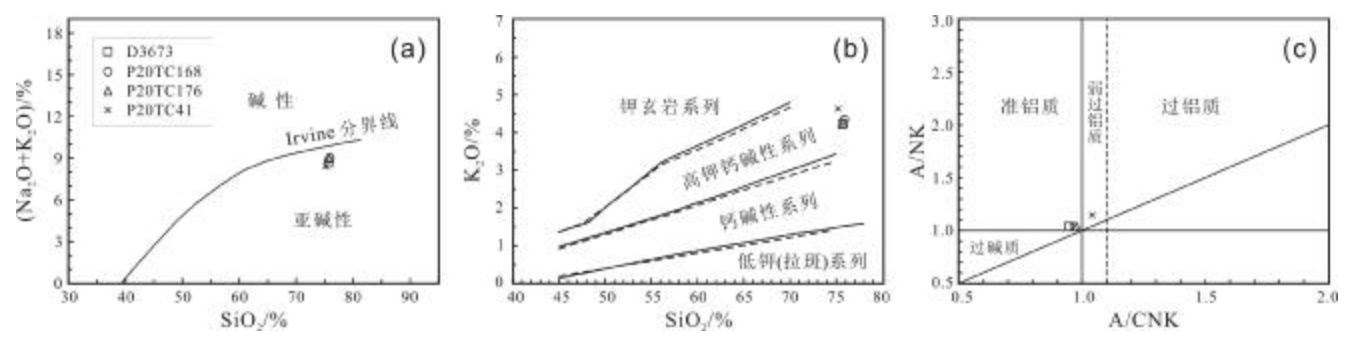


图 6 正长花岗岩分类判别图解

Fig. 6 The classification and discrimination diagrams of syenogranite

土元素配分曲线均呈现平缓右倾型(图 7a),轻稀土曲线较陡,重稀土曲线近水平,表明轻稀土元素分异程度较高,重稀土元素没有明显的分馏. 3 个样品具铕负异常($\delta\text{Eu}=0.4\sim0.43$),仅一个样品铕为正异常($\delta\text{Eu}=1.24$),表明岩浆形成过程中可能发生斜长石的分异^[13].

3.4 微量元素地球化学特征

正长花岗岩样品微量元素分析数据见表 4. 微量元素蛛网图(图 7b)中均显示为右倾,相对富集大离子亲石元素(LILE)Rb、Th、K,亏损高场强元素(HFSE)Nb、Ta、Ti 和 P,曲线形态显示岩石具地壳混染特点^[13].

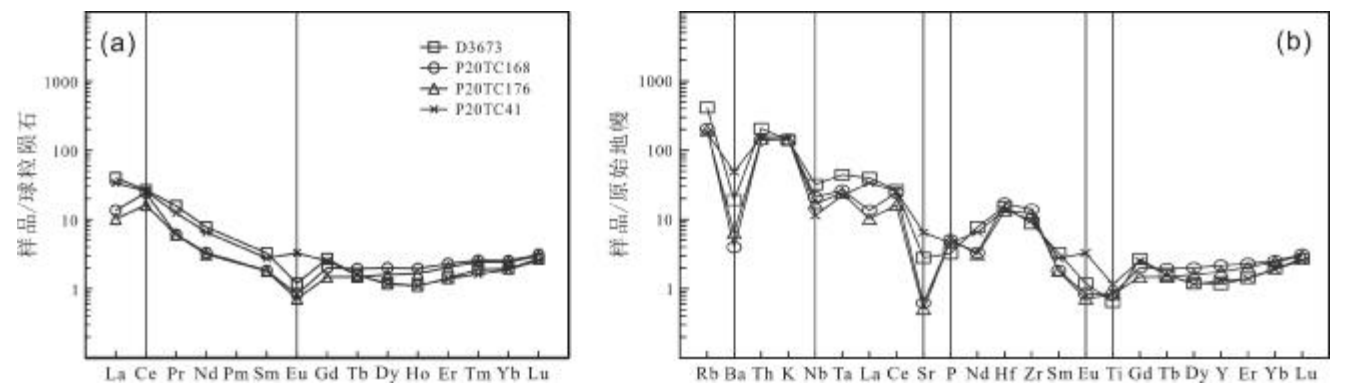


图 7 正长花岗岩球粒陨石标准化稀土元素配分及原始地幔标准化微量元素蛛网图

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized spidergram of syenogranite

表 2 正长花岗岩样品主量元素分析结果

Table 2 Contents of major elements in syenogranite samples				
样品编号	D3673	P ₂₆ TC168	P ₂₆ TC176	P ₂₆ TC41
SiO ₂	75.66	75.88	75.8	75.2
TiO ₂	0.14	0.18	0.18	0.25
Al ₂ O ₃	11.55	12.04	12.02	12
Fe ₂ O ₃	1.57	1.38	1	1.11
FeO	1.46	1.1	1.29	1.7
MnO	0.03	0.03	0.01	0.02
MgO	0.37	0.31	0.24	0.43
CaO	0.59	0.44	0.38	0.57
Na ₂ O	3.98	4.21	4.24	3.32
K ₂ O	4.22	4.34	4.26	4.63
P ₂ O ₅	0.07	0.11	0.11	0.1
LOI	0.02	0.14	0.08	0.26
Total	99.66	100.16	99.61	99.59
K ₂ O/Na ₂ O	1.06	1.03	1	1.39
FeO ^T /MgO	7.76	7.55	9.12	6.28
A/CNK	0.95	1.04	0.97	0.98
A/NK	1.04	1.03	1.04	1.14
σ	2.06	2.22	2.2	1.96
AR	5.16	5.35	5.36	4.44
DI	93.2	94.47	94.87	91.75
T _z /°C	740	780	770	757

含量单位: %.

高场强元素 Nb、Ti、P 和大离子亲石元素 Ba、Sr、La 相对于其他不相容元素为负异常, 构成 5 个明显的亏损槽, 而 Rb、Th、K、Ce、Zr、Hf 形成峰值.

4 讨论

4.1 岩石类型

研究区正长花岗岩样品 K₂O 含量均大于 1%, 而 M 型花岗岩 K₂O 含量通常小于 1%, 且尚不存在与其相伴生岛弧火山岩^[14-15], 与起源于年轻地幔物质的 M 型花岗岩不同. 岩相学特征表明样品不含原生的白云母、堇青石和石榴子石等典型的 S 型花岗岩所含有的特征性富铝矿物^[16]. 同时样品 A/CNK<1.1, 没有变质

表 3 正长花岗岩稀土元素分析结果

Table 3 Contents of REEs in syenogranite samples				
样品编号	D3673	P ₂₆ TC168	P ₂₆ TC176	P ₂₆ TC41
La	27.4	9.33	6.96	23.2
Ce	47.2	43	28.8	45.4
Pr	4.34	1.68	1.66	3.43
Nd	10.5	4.48	4.25	8.88
Sm	1.45	0.81	0.8	1.23
Eu	0.2	0.14	0.12	0.55
Gd	1.61	1.19	0.88	1.5
Tb	0.17	0.21	0.16	0.17
Dy	0.88	1.47	1.17	0.86
Ho	0.18	0.32	0.27	0.18
Er	0.68	1.1	0.98	0.67
Tm	0.14	0.19	0.18	0.12
Yb	0.96	1.25	1.2	0.93
Lu	0.2	0.23	0.22	0.19
Y	5.29	9.84	7.94	5.91
Σ REE	101.2	75.24	55.59	93.22
LR/HR	18.9	9.97	8.42	17.9
δEu	0.4	0.43	0.43	1.24
(La/Yb) _N	19.26	5.03	3.91	16.82

含量单位: 10⁻⁶.

沉积岩发生部分熔融形成熔体的强过铝质特征^[17], 且随着 SiO₂ 含量增加 Al₂O₃ 和 P₂O₅ 的含量明显降低, 也不同于 S 型花岗岩的地球化学成分特点, 同时 Rb 和 Th 的正相关性也表明研究区花岗岩样品为 I 型或 A 型花岗岩, 并不是 S 型花岗岩^[17-18]. 样品主量元素具有高硅(SiO₂>75.20%)、富碱(Na₂O+K₂O>7.95%)、贫钙(CaO<0.59%)、低 FeO^T/MgO 比值(<15)及 FeO^T>1 %特征; 稀土元素(REE)相对富集, 钕为负异常; 微量元素富集大离子亲石元素 Rb、Th、K, 而强烈亏损 Ba、Sr、P、Ti, 中等亏损 Nb、Ta, 具重稀土亏损的特征, 与高分异 I 型花岗岩一致^[17]. 在 (Zr+Nb+Ce+Y)-(FeO^T/MgO) (图 8a)、(Zr+Nb+Ce+Y)-(K₂O+Na₂O)/CaO (图 8b) 花岗岩类型判别图解^[17,19]中, 样品全部落入高分异的 I 型花

表 4 正长花岗岩微量元素分析结果
Table 4 Contents of trace elements in syenogranite samples

样品编号	D3673	P ₂₀ TC168	P ₂₀ TC176	P ₂₀ TC41
Rb	263	130	123	113
Ba	133	27.7	44.1	340
Th	17.5	11.9	12.3	13.2
K	1.75	1.8	1.77	1.92
Nb	22.9	15	12	8.15
Ta	1.81	1.08	0.99	0.91
V	4	7.78	6.12	12.3
Cr	5.44	4.23	4.61	6.83
Sr	59.1	13.1	10.7	137
Sc	2.9	1.57	2.52	2.18
P	0.02	0.02	0.02	0.02
Ta	1.81	1.08	0.99	0.91
Zr	98.6	156	137	109
Hf	4.68	5.24	4.15	4.25
Ti	0.06	0.08	0.07	0.1
Co	6.21	10.5	15.7	11
Ni	4.08	4.41	4.75	4.54
Li	26	4.7	2.47	4.95

含量单位:10⁻⁶.

岗岩区域. 同时由于花岗岩岩浆上升过程大多是绝热形式,岩浆早期结晶温度近似代表了岩浆形成时温度,因此可以通过计算岩浆的早期结晶温度来近似得到其

起源温度. 从 700~1 300 ℃高温试验得出锆石溶解度模拟公式^[20],由 Zr 溶解度公式推导出锆石饱和温度: $\ln D_{Zr}(496000/\text{熔体})=[-3.80-0.85(M-1)]+12900/T$ (式中 T 为绝对温度, D 为分配系数). 计算得到样品形成温度为 740~780 ℃,平均温度为 761.75 ℃,与高分异 I 型花岗岩锆石饱和温度接近^[17].

根据稀土微量元素,尤其是 Ba、Sr、Ti 等元素丰度特征,大兴安岭北部酸性岩浆岩划分为高 Ba-Sr 和低 Ba-Sr 两类^[21]. 样品在微量标准图解中明显的高 Rb、低 Sr、Ti、Ba, 与典型的低 Ba-Sr 花岗岩类相同,在 Rb-Sr-Ba 图解(图 8c)中也全部落入低 Ba-Sr 花岗岩区域.

4.2 岩浆源区及岩石成因

研究区正长花岗岩样品具富集 Rb、Th、K 等大离子亲石元素(LILE)和轻稀土,亏损 Ba、Ti、Nb、Ta 等高场强元素(HFSE),Cr、Co、Ni 等相容元素含量较低的特点. 这些元素地球化学组成指示其与大陆地壳物质具有明显的亲缘性^[13]. Sr、P、Ti 的亏损表明了花岗岩具有正常大陆弧花岗岩的特征,Nb 的亏损指示其与成熟大陆弧花岗岩相异,反映该花岗岩更具有大陆壳的特征,是增生在大陆边缘的新地壳. Zr 的富集和 Nb、Ta、Ti 的亏损表明岩浆源区岩石中以陆壳组分为主. 在(La-Yb)_N-δEu(图 9a)源区判别图解上,研究区花岗岩样品基本落入壳源区域,也反映岩浆来自地壳.

研究区正长花岗岩如果是基性岩浆分离结晶的产物,周围应有大量基性岩出露,而事实上,研究区周围未发现时空关系密切的基性岩,未构成双峰式火山岩^[14-15]. 在蛛网图中,Nb 亏损明显,也可以基本排除基性岩浆分离结晶作用形成的可能^[22-23]. 根据样品在

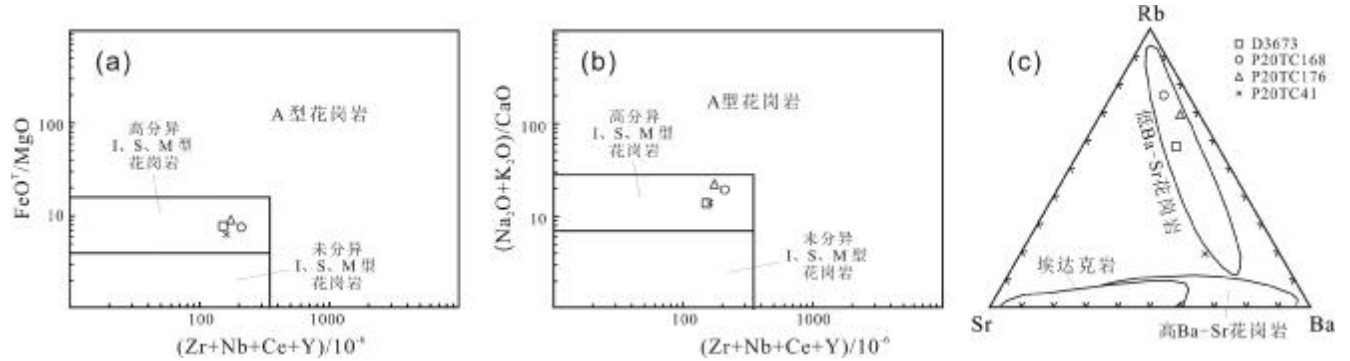


图 8 花岗岩类型判别图解
Fig. 8 The discrimination diagrams for granite types

微量元素 La-La/Yb 判别图解(图 9b)和 La-La/Sm 判别图解(图 9c)中相关性,可以判断花岗岩样品是通过部分熔融作用形成的^[24]。已有研究表明,陆壳减薄是中国东部地质演化的基本事实,早期构造运动导致陆壳加厚,而加厚的陆壳由于重力不稳定发生拆沉作用,使得整个岩石圈地幔与部分下地壳丢失,使软流圈地幔与上覆地壳直接接触,伴随大规模岩浆活动^[1-4, 25-26]。同时,研究区正长花岗岩样品岩石地球化学特征与低 Ba-Sr 花岗岩地球化学特征具有相似性,反映了本区花岗岩样品岩浆成因应与低 Ba-Sr 花岗岩具有一致性,而低 Ba-Sr 花岗岩岩浆成因主要是幔源物质底侵浅部地壳,使地壳物质发生部分熔融作用形成的^[27]。样品较高的锆饱和温度,也说明有外部异常热源的影响。

4.3 构造环境

前人对东北地区早白垩世处于伸展环境已形成共识^[13-15, 25-26, 28-29],但是何种机制导致东北地区早白垩世早期处于张性环境值得探讨。在(Yb+Nb)-Rb 判别图

解(图 10a)中样品落入火山弧、后碰撞花岗岩、同碰撞花岗岩重叠区域。在 Rb/30-Hf-3Ta 判别图解中样品基本落入火山弧区域(图 10b)。在中-酸性火成岩 $\lg\tau$ - $\lg\sigma$ 图解(图 11a),样品均落入造山带火山岩区域(包括岛弧和活动大陆边缘)。在 R_1 - R_2 因子判别图解^[2, 10-11, 13]中(图 11b)样品均落入造山期后区域。样品地球化学特征显示为高钾钙碱性,被认为是后碰撞岩浆活动重要特征之一^[30]。样品微量元素特征与“后碰撞”构造环境花岗岩特征也极为相似^[31],相当于碰撞造山晚期阶段。上述特征显示正长花岗岩形成与造山后作用有关。在中酸性岩浆岩 Th/Yb-Ta/Yb 构造环境判别图解(图 12a)中,样品均落入活动大陆边缘范围内。Nb、Sr 元素负异常,也表明研究区为活动大陆边缘环境^[13]。在 $\lg[\text{CaO}/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})]$ - SiO_2 判别图解(图 12b)中,样品均落入拉张区域。综合以上特征表明,伊勒呼里山中段正长花岗岩形成于闭合造山活动后期,位于活动大陆边缘伸展环境下形成的火山弧花岗岩。

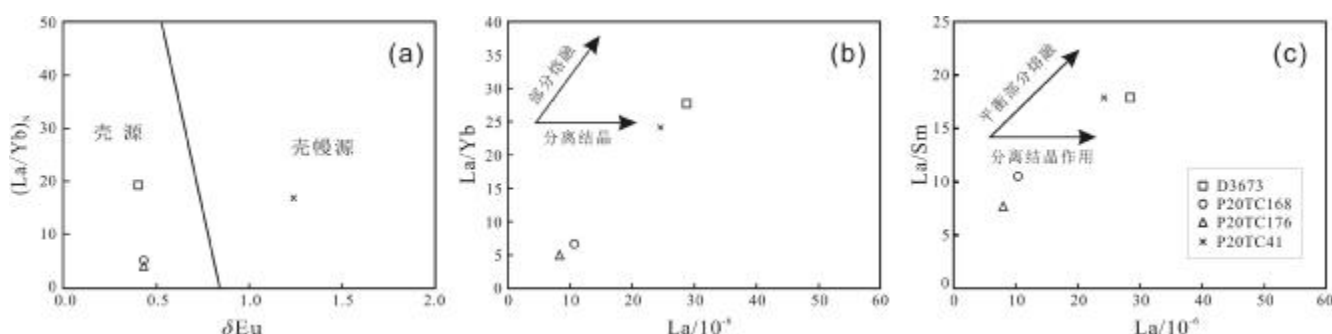


图9 花岗岩源区判别图解

Fig. 9 The discrimination diagrams for granite sources

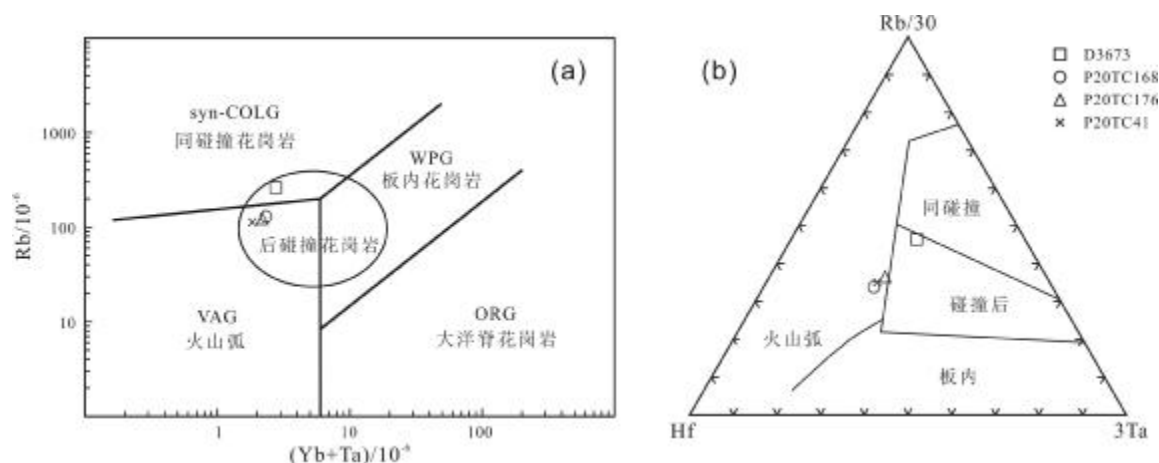


图10 正长花岗岩(Yb+Ta)-Rb图解及Rb/30-Hf-3Ta图解

Fig. 10 The (Yb+Ta)-Rb and Rb/30-Hf-3Ta diagrams of syenogranite

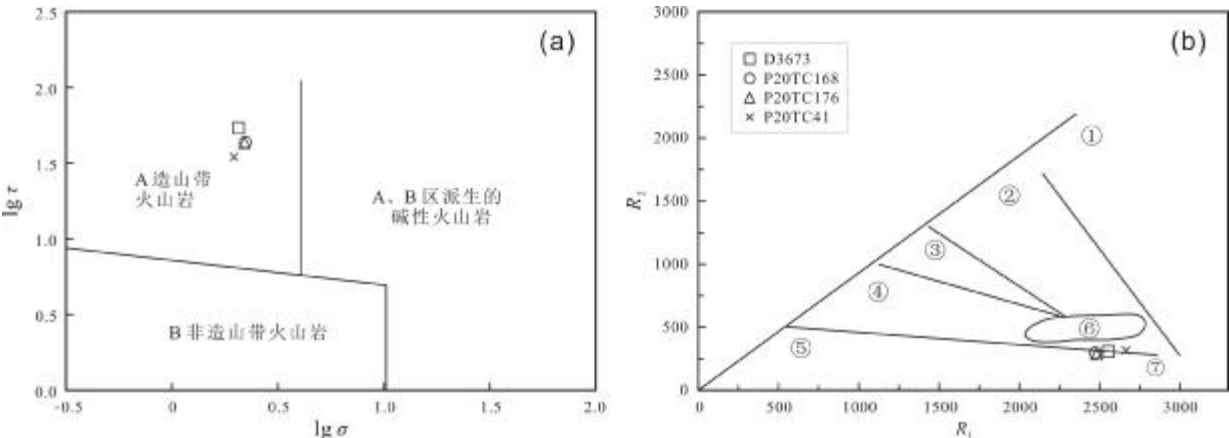


图 11 正长花岗岩 $\lg\sigma$ - $\lg\tau$ 图解及 R_1 - R_2 图解

Fig. 11 The $\lg\sigma$ - $\lg\tau$ and R_1 - R_2 diagrams of syenogranite

①地幔斜长花岗岩(mantle plagiogranite); ②破坏性活动板块边缘(板块碰撞前)花岗岩(destructive active plate margin granite, pre-collision); ③板块碰撞后隆起期花岗岩(granite of post-collision uplift stage); ④晚造期花岗岩(late-orogenic granite); ⑤非造山区 A 型花岗岩(anorogenic A-type granite); ⑥同碰撞(S 型)花岗岩(syn-collision granite, S-type); ⑦造山期后 A 型花岗岩(postorogenic A-type granite)

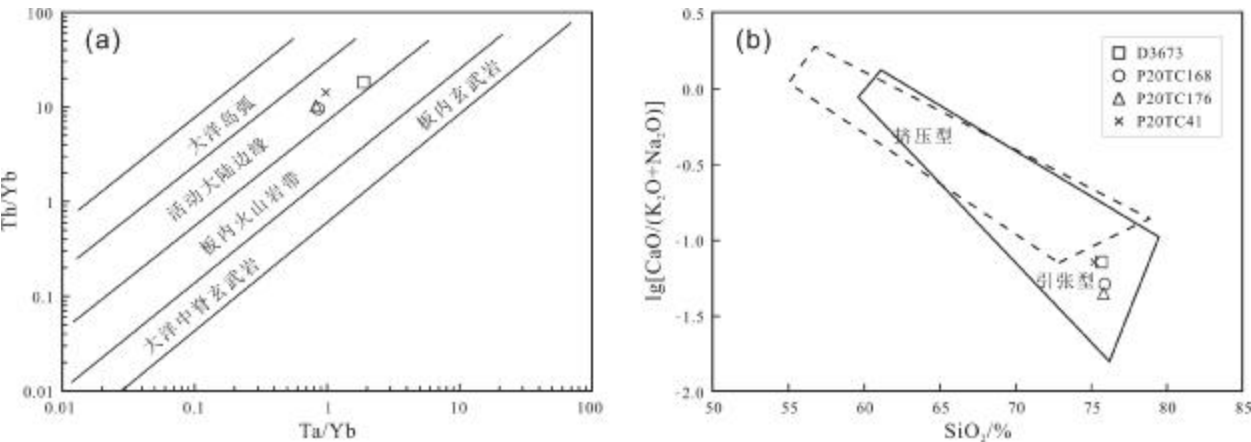


图 12 正长花岗岩 Ta/Yb-Th/Yb 图解及 SiO_2 - $\lg[\text{CaO}/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})]$ 图解

Fig. 12 The Ta/Yb-Th/Yb and SiO_2 - $\lg[\text{CaO}/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})]$ diagrams of syenogranite

近年来对大兴安岭岩浆岩研究表明, 蒙古-鄂霍次克洋具有自西向东剪刀式闭合的特点, 西部可能于晚三叠世开始闭合, 东部可能于晚侏罗世一早白垩世完成闭合, 同时古太平洋板块也在早一中侏罗世已经开始向欧亚大陆东部边缘俯冲, 此时欧亚大陆也开始受到古太平洋构造体系的影响, 因此在早白垩世期间大兴安岭地区可能受蒙古-鄂霍次克洋闭合和古太平洋俯冲的双重影响^[25-26, 32-33]. 但是, 中侏罗世晚期一早白垩世早期阶段为古太平洋板块俯冲的间歇期, 早白垩世早期(145~135 Ma)古太平洋以北西方向低速俯冲于欧亚大陆之下^[34-35], 由于大兴安岭地区远离古太平洋俯冲带, 此时受古太平洋俯冲作用的影响较弱, 因

此研究区正长花岗岩形成主要与蒙古-鄂霍次克洋相关, 标志着蒙古-鄂霍次克洋闭合碰撞结束.

5 结论

综上所述的岩相学、年代学和地球化学研究结果, 得出以下结论.

(1)正长花岗岩测年样品的锆石阴极发光显示, 锆石均具有较明显的振荡环带结构, 且样品中的 Th、U 含量较高以及较高的 Th/U 比值, 为典型的岩浆成因锆石. LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年加权平均年龄显示, 正长花岗岩岩体的 U-Pb 锆石年龄为 143.90 ± 1.20 Ma, 属于早白垩世早期.

(2)正长花岗岩岩体主量元素特征表现为高硅、富碱、贫镁钙,低 FeO^T/MgO 比值,属准铝质-弱过铝质、高钾钙碱性系列;普遍轻稀土元素(LREE)富集,重稀土(HREE)亏损,具弱-中铕的负异常;微量元素普遍富集大离子亲石元素(LILE)Rb、Th、K,亏损高场强元素(HFSE)Nb、Ta、Ti、P和大离子亲石元素(LILE)Ba、Sr,为典型的低Ba-Sr、高分异I型花岗岩。岩石圈减薄、基性岩浆上涌接触地壳,使地壳物质发生部分熔融。

(3)正长花岗岩形成主要与蒙古-鄂霍次克洋相关,是蒙古鄂霍次克洋闭合造山活动后期,位于活动大陆边缘伸展环境下形成的火山弧花岗岩,标志着蒙古-鄂霍次克洋闭合碰撞结束。

参考文献(References):

- [1] 骆念岗,高莲凤,张璟,等. 大兴安岭北段宜里地区早侏罗世二长花岗岩 U-Pb 年龄、地球化学特征及其构造意义[J]. 地质论评, 2021, 67(6): 1649-1669.
Luo N G, Gao L F, Zhang J, et al. U-Pb age and geochemical characteristics of the Early Jurassic monzogranite in Yili area, northern Great Hinggan Mountains, and their tectonic implications [J]. Geological Review, 2021, 67(6): 1649-1669.
- [2] 尹志刚,李敏,李文龙,等. 大兴安岭中北段大金山地区早侏罗世埃达克质花岗岩闪长岩的成因及构造环境[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2019, 38(1): 69-79.
Yin Z G, Li M, Li W L, et al. The origin and tectonic environment of the early Jurassic adakitic granodiorite in the Dajinshan area of the central and northern Da Hinggan Range[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2019, 38(1): 69-79.
- [3] 刘涛,吉峰,王文东,等. 大兴安岭北部新林地区早侏罗世火山岩的发现及其地质意义[J]. 地质与资源, 2022, 31(1): 1-12.
Liu T, Ji F, Wang W D, et al. Discovery of the Early Jurassic volcanic rocks in Xinlin area of northern Daxinganling Mountains: Geological implication[J]. Geology and Resources, 2022, 31(1): 1-12.
- [4] 李晓海,张海华,李文博,等. 大兴安岭甘南地区花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. 地质与资源, 2023, 32(6): 655-663.
Li X H, Zhang H H, Li W B, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geochemistry of the granites in Gannan area, Daxinganling Mountains: Geological implication[J]. Geology and Resources, 2023, 32(6): 655-663.
- [5] 吴福元,李献华,杨进辉,等. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 2007, 23(6): 1217-1238.
Wu F Y, Li X H, YANG J H, et al. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(6): 1217-1238.
- [6] 王涛. 花岗岩研究与大陆动力学[J]. 地学前缘, 2000, 7(S2): 137-146.
Wang T. Studies on granites and continental dynamics[J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(S2): 137-146.
- [7] 董申保. 近代花岗岩研究的回顾[J]. 高校地质学报, 1995, 1(2): 1-12.
Dong S B. A general review on the recent studies of granite[J]. Geological Journal of China Universities, 1995, 1(2): 1-12.
- [8] 张旗,潘国强,李承东,等. 花岗岩构造环境问题: 关于花岗岩研究的思考之三[J]. 岩石学报, 2007, 23(11): 2683-2698.
Zhang Q, Pan G Q, Li C D, et al. Are discrimination diagrams always indicative of correct tectonic settings of granites? Some crucial questions on granite study (3) [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(11): 2683-2698.
- [9] 胡永葵,范月野,房冬昱,等. 大兴安岭北段南木地区斑岩型铜矿地质特征与成矿预测[J]. 地质与资源, 2022, 31(6): 748-753.
Hu Y Z, Fan Y Y, Fang D Y, et al. Geology and metallogenic prediction of porphyry copper deposit in Nanmu area, northern Daxinganling Mountains[J]. Geology and Resources, 2022, 31(6): 748-753.
- [10] 尹志刚,宫兆民,王春生,等. 小兴安岭平顶山一带早侏罗世花岗岩类年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(1): 107-125.
Yin Z G, Gong Z M, Wang C S, et al. Chronological, geochemical characteristics and geological significance of Early Jurassic granites in Pingdingshan area of Lesser Xing'an Range [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(1): 107-125.
- [11] 尹志刚,庞学昌,王春生,等. 小兴安岭南部早侏罗世二长花岗岩形成时代、地球化学特征及地质意义[J]. 地质通报, 2020, 39(1): 27-39.
Yin Z G, Pang X C, Wang C S, et al. Formation age, geochemical characteristics and geological significance of the Early Jurassic monzonitic granites in southern Xiao Hinggan Mountains[J]. Geological Bulletin of China, 2020, 39(1): 27-39.
- [12] Yan M C, Chi Q H. The chemical compositions of the continental crust and rocks in the eastern part of China[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [13] 尹志刚,宫兆民,张跃龙,等. 大兴安岭伊勒呼里山早白垩世碱长花岗岩年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. 地质通报, 2018, 37(6): 1061-1074.
Yin Z G, Gong Z M, Zhang Y L, et al. Geochronology, geochemistry and geological significance of the Early Cretaceous alkali feldspar granites in the Yilehuli Mountain, Da Hinggan, Mountain[J]. Geological Bulletin of China, 2018, 37(6): 1061-1074.
- [14] 尹志刚,王文材,张跃龙,等. 伊勒呼里山中生代火山岩: 锆石 U-Pb 年代学及其对岩浆事件的制约[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(3): 766-780.
Yin Z G, Wang W C, Zhang Y L, et al. Mesozoic volcanic rocks in

- Yilehuli area: Zircon U-Pb ages and their constraints on the magmatic events[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2016, 46(3): 766-780.
- [15]董坤鹏. 伊勒呼里山中生代火山岩岩石化学特征及其地质意义[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- Dong K P. Geochemical characteristics and geological significance of the Mesozoic lavas from the Yilehuli[D]. Changchun: Jilin University, 2012.
- [16]宋维民, 庞雪娇, 付俊彧, 等. 内蒙古科尔沁右翼中旗碱长花岗岩锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学及其动力学意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2015, 45(3): 847-859.
- Song W M, Pang X J, Fu J Y, et al. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry and dynamics of the alkali feldspar granite in Horqin Right Wing Middle Banner of Inner Mongolia, with implications for the geodynamic setting [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2015, 45(3): 847-859.
- [17]陈璟元, 杨进辉. 佛冈高分异 I 型花岗岩的成因: 来自 Nb-Ta-Zr-Hf 等元素的制约[J]. *岩石学报*, 2015, 31(3): 846-854.
- Chen J Y, Yang J H. Petrogenesis of the Fogang highly fractionated I-type granitoids: Constraints from Nb, Ta, Zr and Hf [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(3): 846-854.
- [18]纪政, 葛文春, 杨浩, 等. 大兴安岭中段塔尔气地区早白垩世花岗岩成因及形成构造环境[J]. *世界地质*, 2016, 35(2): 283-296.
- Ji Z, Ge W C, Yang H, et al. Petrogenesis of Early Cretaceous granites in Taerqi area of central Great Xing'an Range and its tectonic setting [J]. *Global Geology*, 2016, 35(2): 283-296.
- [19]邓晋福, 刘翠, 冯艳芳, 等. 关于火成岩常用图解的正确使用: 讨论与建议[J]. *地质论评*, 2015, 61(4): 717-734.
- Deng J F, Liu C, Feng Y F, et al. On the correct application in the common igneous petrological diagrams: Discussion and suggestion[J]. *Geological Review*, 2015, 61(4): 717-734.
- [20]Watson E B, Harrison T M. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1983, 64(2): 295-304.
- [21]张吉衡. 大兴安岭中生代火山岩年代学及地球化学研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2009.
- Zhang J H. Geochronology and geochemistry of the Mesozoic volcanic rocks in the Great Xing'an Range, northeastern China[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2009.
- [22]杨高学, 李永军, 张兵, 等. 新疆西准噶尔接特布调 A 型花岗岩年代学、地球化学及岩石成因[J]. *地球学报*, 2013, 34(3): 295-306.
- Yang G X, Li Y J, Zhang B, et al. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of the Jietebutiao A-type granites in West Junggar, Xinjiang [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2013, 34(3): 295-306.
- [23]杨钢, 肖龙, 高睿, 等. 内蒙古阿尔山地区中生代 A 型花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其构造意义[J]. *地质通报*, 2014, 33(5): 649-660.
- Yang G, Xiao L, Gao R, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb age, geochemistry and tectonic significance of Mesozoic A-type granites in Aershan area, Inner Mongolia[J]. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33(5): 649-660.
- [24]邓晋福, 罗照华, 苏尚国, 等. 岩石成因、构造环境与成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 2004.
- Deng J F, Luo Z H, Su S G, et al. Petrogenesis, tectonic environment and mineralization [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004. (in Chinese)
- [25]唐克东, 鞠楠, 张大权, 等. 关于古亚洲洋构造演化研究的几点思考[J]. *地质与资源*, 2022, 31(3): 246-258, 330.
- Tang K D, Ju N, Zhang D Q, et al. Implication of the tectonic evolution of Paleo-Asian Ocean[J]. *Geology and Resources*, 2022, 31(3): 246-258, 330.
- [26]张允平, 宋维民, 那福超, 等. 蒙古-鄂霍次克褶皱系地质特征及构造属性讨论[J]. *地质与资源*, 2022, 31(3): 259-274.
- Zhang Y P, Song W M, Na F C, et al. Geological characteristics and tectonic attribute of Mongolia-Okhotsk fold system [J]. *Geology and Resources*, 2022, 31(3): 259-274.
- [27]林强, 葛文春, 曹林, 等. 大兴安岭中生代双峰式火山岩的地球化学特征[J]. *地球化学*, 2003, 32(3): 208-222.
- Lin Q, Ge W C, Cao L, et al. Geochemistry of Mesozoic volcanic rocks in Da Hinggan Ling: The bimodal volcanic rocks [J]. *Geochimica*, 2003, 32(3): 208-222.
- [28]李晓波. 大兴安岭北部早白垩世火山-沉积地层序列与构造古地理[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- Li X B. Early Cretaceous volcanic-sedimentary strata sequence and tectono paleogeography, in northern Daxinganling, China[D]. Changchun: Jilin University, 2007.
- [29]孟凡超, 刘嘉麒, 崔岩, 等. 中国东北地区中生代构造体制的转变: 来自火山岩时空分布与岩石组合的制约[J]. *岩石学报*, 2014, 30(12): 3569-3586.
- Meng F C, Liu J Q, Cui Y, et al. Mesozoic tectonic regimes transition in the Northeast China: Constraints from temporal-spatial distribution and associations of volcanic rocks [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(12): 3569-3586.
- [30]Zhao X, Coe R S, Gilder S A, et al. Palaeomagnetic constraints on the palaeogeography of China: Implications for Gondwanaland[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 1996, 43(6): 643-672.
- [31]Liégeois J P, Navez J, Hertogen J, et al. Contrasting origin of post-collisional high-K calc-alkaline and shoshonitic versus alkaline and peralkaline granitoids. the use of sliding normalization [J]. *Lithos*, 1998, 45(1/4): 1-28.

- Mesozoic volcanism of southeastern China [J]. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 1994, 9(4): 387–396.
- [53] 周新民, 李武显. 中国东南部晚中生代火成岩成因: 岩石圈消减和玄武岩底侵相结合的模式 [J]. *自然科学进展*, 2000, 10(3): 240–247.
- Zhou X M, Li W X. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeast China: A model combining lithospheric reduction and basalt bottom intrusion [J]. *Progress in Natural Science*, 2000, 10(3): 240–247. (in Chinese)
- [54] Gilder S A, Gill J, Coe R S, et al. Isotopic and paleomagnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of South China [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1996, 101 (B7): 16137–16154.
- [55] 李献华, 周汉文, 刘颖, 等. 桂东南钾玄质侵入岩带及其岩石学和地球化学特征 [J]. *科学通报*, 1999, 44(18): 1992–1998.
- Li X H, Zhou H W, Liu Y, et al. Shoshonitic intrusive suite in SE Guangxi: Petrology and geochemistry [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(7): 653–659.
- [56] 陈志刚, 李献华, 李武显. 全南正长岩的地球化学特征及成因 [J]. *地质论评*, 2002, 48(S1): 77–83.
- Chen Z G, Li X H, Li W X. Geochemical characteristics and origin of the Quannan syenite [J]. *Geological Review*, 2002, 48(S1): 77–83.
- [57] 王文东, 刘涛, 周传芳, 等. 黑龙江富源沟晚三叠世中-基性火山岩的厘定及地质意义 [J]. *地质与资源*, 2023, 32(6): 670–680.
- Wang W D, Liu T, Zhou C F, et al. Identification of the Late Triassic Fuyuangou intermediate-basic volcanic rocks in Heilongjiang Province: Geological implication [J]. *Geology and Resources*, 2023, 32 (6): 670–680.
- [58] Meschede M. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram [J]. *Chemical Geology*, 1986, 56(3/4): 207–218.
- [59] 李强, 程学芹, 王艳凯, 等. 大兴安岭北段盘古河上游早古生代中基性杂岩体 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义 [J]. *地质论评*, 2024, 70(1): 155–174.
- Li Q, Cheng X Q, Wang Y K, et al. U-Pb age, geochemical characteristics of the Early Paleozoic intermediate-basic complex in the upper reaches of Pangu River, northern Great Hinggan Mountains and their geological implications [J]. *Geological Review*, 2024, 70(1): 155–174.

(上接第 276 页/Continued from Page 276)

- [32] Tomurtogoo O, Windley B F, Kröner A, et al. Zircon age and occurrence of the Adaatsag ophiolite and Muro shear zone, central Mongolia: Constraints on the evolution of the Mongol-Okhotsk Ocean, suture and orogen [J]. *Journal of the Geological Society*, 2005, 162 (1): 125–134.
- [33] 徐美君, 许文良, 王枫, 等. 小兴安岭中部早侏罗世花岗质岩石的年代学与地球化学及其构造意义 [J]. *岩石学报*, 2013, 29(2): 354–368.
- Xu M J, Xu W L, Wang F, et al. Geochronology and geochemistry of the Early Jurassic granitoids in the central Lesser Xing'an Range, NE China and its tectonic implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(2): 354–368.
- [34] Xu W L, Pei F P, Wang F, et al. Spatial-temporal relationships of Mesozoic volcanic rocks in NE China: Constraints on tectonic overprinting and transformations between multiple tectonic regimes [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 74: 167–193.
- [35] Maruyama S, Send T. Orogeny and relative plate motions: Example of the Japanese Islands [J]. *Tectonophysics*, 1986, 127(3/4): 305–329.